



TITLE:

博士論文概要

AUTHOR(S):

CITATION:

博士論文概要. Cue 2013, 29: 35-57

ISSUE DATE:

2013-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/176905>

RIGHT:

博士論文概要

[課程博士一覧]

小野田 有 吾	「Trapping of Yb ⁺ Loaded through Photoionization in RF Ion Trap」 (光イオン化法で生成した Yb ⁺ の RF イオントラップ)	平成 24 年 1 月 23 日
内 山 宏 樹	「IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術に関する研究」	平成 24 年 1 月 23 日
向 井 清 史	「ヘリオトロン J プラズマにおけるマイクロ波 AM 反射計を用いた電子密度分布計測および粒子輸送特性に関する研究」	平成 24 年 1 月 23 日
宅 野 嗣 大	「High Frequency Switching of SiC Transistors and its Application to In-home Power Distribution」 (SiC トランジスタの高周波スイッチングとその家庭内電力配電への応用)	平成 24 年 3 月 26 日
笹 山 瑛 由	「ブレイン・マシン・インタフェースに向けた多チャネル脳波計測による脳内情報抽出法および識別法に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
小 西 武 史	「直流電気鉄道における電力需給システムの高度化に関する基礎研究」	平成 24 年 3 月 26 日
占 部 継一郎	「Spectroscopic Study of Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure」 (大気圧誘電体バリア放電の分光学的研究)	平成 24 年 3 月 26 日
奥 村 宏 典	「Formation Mechanism of Extended Defects in AlN Grown on SiC {0001} and Their Reduction by Initial Growth Control」 (SiC{0001} 基板上に成長した AlN 層の拡張欠陥の生成機構と初期成長制御によるその低減)	平成 24 年 3 月 26 日
三 宅 裕 樹	「Interface Control of AlGaIn/SiC Heterojunction and Development of High-Current-Gain SiC-Based Bipolar Transistors」 (AlGaIn/SiC ヘテロ接合界面制御および高電流増幅率 SiC 系バイポーラトランジスタの実現)	平成 24 年 3 月 26 日
梅 田 健 一	「周波数変調 AFM による固液界面における静電相互作用力の解明およびその表面電荷分布計測への応用」	平成 24 年 3 月 26 日
鈴 木 一 博	「3次元フォースマッピング法による固液界面の分子スケール構造物性評価」	平成 24 年 3 月 26 日
服 部 真 史	「二酸化チタンナノチューブ光触媒を用いた水素生成・分離一体型メンブレンの開発」	平成 24 年 3 月 26 日
岩 橋 清 太	「フォトリック結晶レーザの共振特性に与える格子構造の包括的解析と機能性向上」	平成 24 年 3 月 26 日
瀧 川 信 一	「複素平面波展開法を用いたフォトリック結晶レーザの解析に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
Menaka De Zoysa	「Thermal Emission Control by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals」 (量子井戸のサブバンド間遷移と 2 次元フォトリック結晶を用いた熱輻射制御)	平成 24 年 3 月 26 日

池之上 卓 己	「超音波噴霧法による薄膜形成と有機薄膜太陽電池への応用に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
吉 田 誠	「広帯域マルチキャリア無線伝送技術に関する研究」	平成 24 年 3 月 26 日
横 田 健 治	「通信品質向上のためのネットワークシステム制御技術」	平成 24 年 3 月 26 日
田 村 昌 也	「Research on a compact and high-performance filter for wireless LAN and suitable sensor structure for downsizing of measurement equipment based on control of electromagnetic waves」 (電磁波制御技術を用いた小型で高性能な無線 LAN 用フィルタ、及び測定装置の小型化に適したセンサ構造に関する研究)	平成 24 年 9 月 24 日
青 柳 西 蔵	「行動変容のためのオンラインコミュニティに関する研究」	平成 24 年 9 月 24 日
福 原 始	「Miniaturization and Integration of Measurement Systems for Space Electromagnetic Environments」 (宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)	平成 24 年 9 月 24 日

小野田 有 吾 (北野教授)

「Trapping of Yb⁺ Loaded through Photoionization in RF Ion Trap」

(光イオン化法で生成した Yb⁺ の RF イオントラップ)

平成 24 年 1 月 23 日授与

超高真空中の狭い空間に閉じ込めたイオンは、周りから孤立した状態にあり、その内部状態が受ける擾乱が少ない。このため、きわめて正確な原子時計の基準や量子計算機への応用が盛んに研究されている。イオンを閉じこめる方法には、高周波 (RF) 電場を用いる RF イオントラップがよく用いられている。トラップへのイオンの導入は、通常、トラップ内で原子をイオン化して行う。イオン化方法として、加速させた電子を衝突させる電子衝撃法が用いられてきたが、最近、光イオン化法が注目されている。光イオン化法は (1) 詳細は省略するが、トラップポテンシャルを変形させイオンを加熱する効果が小さい、(2) 中間準位の同位体シフトを利用して、特定の同位体のみを選択的にイオン化できる、(3) 導入中もイオンの蛍光を観測できるので、少数個導入がやりやすい、という利点をもつ。

研究室では光時計として有望なイッテルビウムイオン (Yb⁺) の研究を進めている。光イオン化を用いた Yb⁺ の導入は他の研究機関でも採用されているが、その詳細な特性を本研究ではじめて明らかにした。

Yb 原子の光イオン化は、2 段階励起、波長 399 nm 光で基底準位 ¹S₀ から ¹P₁ 準位へ、¹P₁ 準位からさらにイオン化ポテンシャル以上に励起して行う (図 1)。波長 399 nm 光はチタニウムサファイアレーザーの第 2 高調波を、効率を高めるために光共振器内に設置した非線形光学結晶で発生させた。その際、結晶端面の反射による損失を出入射面の反射を干渉させて取り除き、変換効率を高めた。結晶の温度制御により低損失状態を長時間維持できることを示した。波長 399 nm 光を特定の同位体に同調させるために、ランプ中の Yb の飽和吸収を検出した。原子の密度を上げていくと線形吸収によるレーザー光の減衰が大きくなり、やがて飽和パワー以下になって飽和吸収信号が消失することを見出した。存在比の大きい同位体からこの状態となることを利用し、存在比の小さい同位体の信号だけを残せることを示した。

続いて、様々な条件でイオン導入速度を測定した。導入速度は導入時のイオン数の時間変化から求めた。個数の推定は、トラップ内のイオンの調和振動を電氣的共鳴で検出し、その信号の大きさから行った。トラップの非線形性から生じる個数推定の不確かさを低減する工夫をした。第 2 励起光の波長依存性を、外部共振器型紫外半導体レーザーを複数波長準備して測定した (図 2)。測定した範囲内では、イオン化エネルギー近傍が導入速度最大で、導入断面積を 40 (15) Mb と推定した。波長 369.5nm の Yb⁺ レーザー冷却光が、第 2 励起光の代替として使えることを定量的に示した。第 2 励起光がイオン化ポテンシャルより低くなると導入速度は大きく減少する一方、リユードベリ準位への励起を導入速度の増加として観測できることが分かった。第 1 励起光だけでもイオンが生成されることが知られていたが、その導入速度は 3 桁小さく ¹P₁ 準位からの非共鳴 2 光子吸収が支配的なイオン生成過程であることが分かった。また、第 1 励起で同位体混合物から特定同位体を選択的にイオン化し導入する場合、電荷交換衝突が純度を制限する要因のひとつとなる。理論的検討から、電荷交換速度よりも十分短い時間でイオン導入を終了する必要があることが分かった。同位体 171 と 174 を使って電荷交換衝突速度を測定し、純度を保って導入できる最大イオン数を推定したところ、存在比が 0.1% ともっとも小さい ¹⁶⁸Yb の場合のみ、電荷交換の影響が無視できないことがわかった。

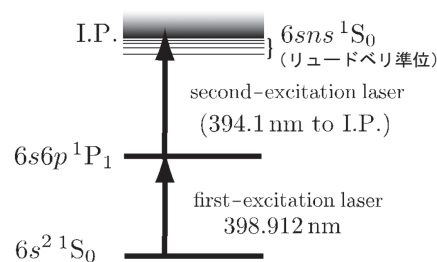


図 1 Yb 原子の準位 (関係分)

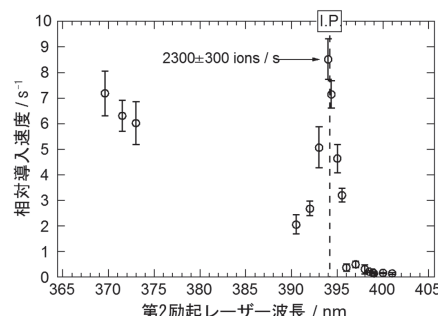


図 2 イオン導入速度の第 2 励起波長依存性

内 山 宏 樹（佐藤亨教授）

「IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術に関する研究」

平成 24 年 1 月 23 日授与

近年、携帯電話、情報家電、IC カード等の普及にともない、個人が利用する電子機器が様々な形で外部のネットワークと接続されるユビキタス環境がますます進展しつつあります。このようなユビキタス環境では、多種多様な電子機器やネットワークがサービス提供時に利用されるため、ユーザの利用環境に応じて適切な「安全」を提供することが必要となります。このような安全を提供するために、機器同士の正当性を確認する「認証プロトコル」や機器同士で暗号通信を行うために必要な鍵を共有する「鍵交換プロトコル」といったセキュリティプロトコルが利用されることが一般的ですが、セキュリティプロトコルはデバイス毎に固定的に利用される場合が多く、利用するサービスが増加すればするほど多数のデバイスを持ち歩く必要があり、ユーザの利便性を損ねていました。また、実サービスの開始後に利用中のセキュリティプロトコルに脆弱性が発見される場合があり、このような脆弱性への対策を迅速に行う仕組みを提供することが急務となっていました。

本論文では、このような背景に鑑み、ユビキタス環境で利用されるデバイスの中でも処理能力が低く、メモリ容量も少ない IC カードに適用可能なセキュリティプロトコルの動的なカスタマイズ技術の実現を目指し研究を実施しました。具体的には、図 1 に示すように、セキュリティプロトコルの動的なカスタマイズに適した構成として、IC カード内のアプリケーションと OS の間のミドルウェアとしてセキュリティプロトコル機能を提供するモジュールを配置する構成を提案し、IC カードの外部で生成したモジュールを置換する外部カスタマイズ方式と IC カードの内部で動的にセキュリティプロトコルのカスタマイズを行う内部カスタマイズ方式という 2 種類のセキュリティプロトコルカスタマイズ方式を開発しました。開発した IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ技術を実サービスに対して適用してゆくことにより、ユビキタス環境におけるユーザの利便性を損なうことなく安全性の向上に繋がることが期待されます。

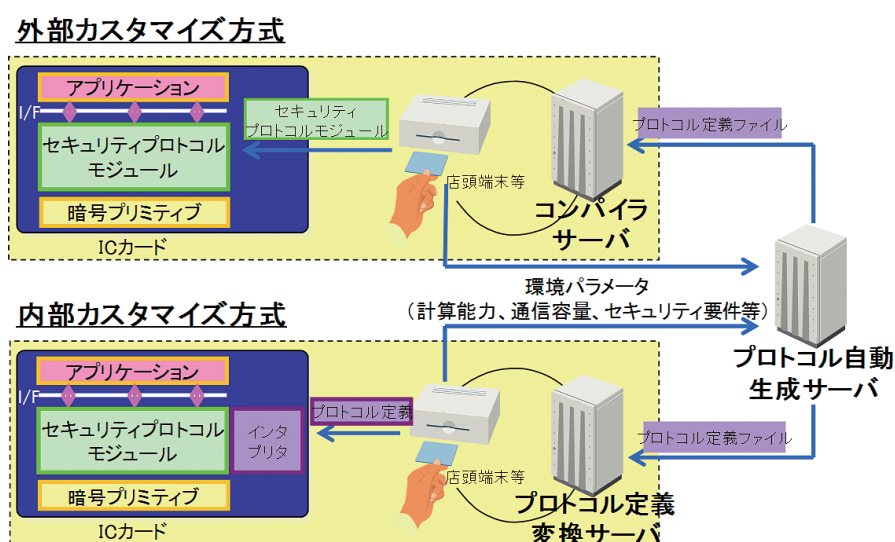


図 1：開発した IC カードのセキュリティプロトコルカスタマイズ方式

向 井 清 史 (水内教授)

「ヘリオトロンJプラズマにおけるマイクロ波 AM 反射計を用いた電子密度分布計測および粒子輸送特性に関する研究」

平成 24 年 1 月 23 日授与

磁場閉じ込めプラズマによる核融合発電は、原理的に暴走が生じない、高レベル放射性廃棄物が発生しない、CO₂を排出しない、安定して高出力が得られる、といった長所から、その実現が期待されている。核融合プラズマ研究において、粒子輸送研究は非常に重要な研究課題の一つであり、電子密度分布計測はその基礎となるものである。本論文は、エネルギー理工学研究所の磁場プラズマ閉じ込め装置であるヘリオトロンJにおいて、電子密度分布計測装置を開発し、計測された密度分布を基に、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマの粒子輸送特性を明らかにしたものである。

研究では、粒子輸送研究に必要な、高時間分解能かつ広測定空間領域での電子密度分布計測装置として、図1に示すようなマイクロ波振幅変調 (AM) 反射計の開発を行った。ヘリオトロンJのプラズマ特性を考慮し、時間分解能を1 msとし、予測される凹状の分布に対応できるよう波の入射モードとしてXモードを選択した。また、搬送周波数を33-56 GHzと選択することにより、線平均電子密度 $\bar{n}_e \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマで、プラズマ周辺部から中心部に渡る広い測定区間領域を実現した。開発したAM反射計を実際にプラズマ計測へと適用し、ECHプラズマでは凹状の、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱プラズマではピークした密度分布を得ることに成功した。

また、ECHプラズマにおいてガスパフを用いた密度変調実験を行い、粒子輸送解析を行うことでプラズマコア部での拡散係数 D_{core} および対流速度 V_{core} の評価を行った。背景の \bar{n}_e を $0.6, 0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とし、50 Hzの密度変調を印加した。輸送解析の結果、 D_{core} は \bar{n}_e が増加すると減少することが分かった。また、 V_{core} はいずれの \bar{n}_e でも正の値を示しており、低密度でより大きい値を示すことが分かった。これらは、中心加熱のECHプラズマでは、外向きの対流項が粒子輸送を決定する上で重要な役割を果たしており、特に低密度領域でその影響が大きいことを定量的に示す結果である。

以上の結果は、ヘリオトロンJの最も重要な課題である、プラズマ閉じ込め磁場配位 (ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位) の実験的最適化を進める上で非常に重要な成果である。今後、粒子輸送特性の磁場配位依存性を明らかにすることで磁場配位最適化への貢献が大いに期待される。

その他、本論文では、通常的气体パフによる粒子供給時と比較し高いプラズマ蓄積エネルギーが得られる、超音速分子ビーム入射による粒子供給時の電子密度分布挙動を明らかにした。この結果は、ヘリオトロンJの粒子供給法最適化を推進する手掛かりとなる成果である。

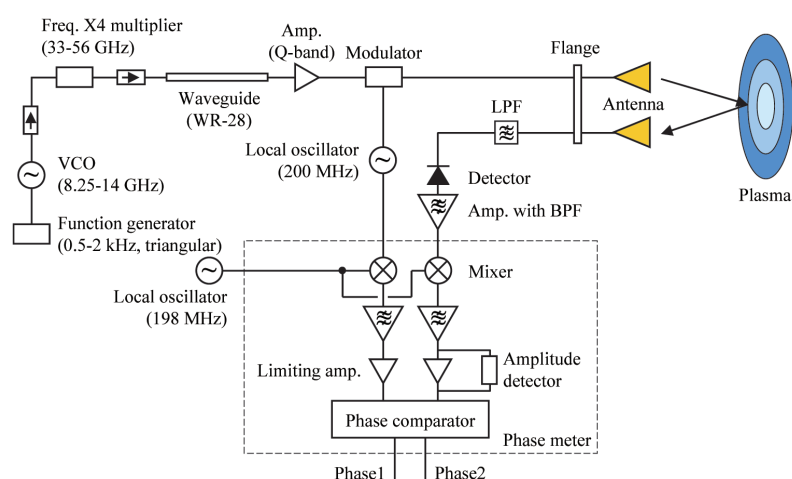


図1 マイクロ波 AM 反射計の構成図

宅 野 嗣 大 (引原教授)

「High Frequency Switching of SiC Transistors and its Application to In-home Power Distribution」

(SiC トランジスタの高周波スイッチングとその家庭内電力配電への応用)

平成 24 年 3 月 26 日 授与

近代以降の社会は、電気エネルギーおよび通信によって支えられているとって過言ではない。電気通信は、モールス信号のように符号化されたデジタル通信に始まり、次第にアナログへ変遷し、現在、再びデジタル通信が全盛を迎えている。一方の電気エネルギーの供給は、エジソン、テスラの直流交流論争の時代から今まで、一貫してアナログのネットワークをもとに発展してきた。しかし、電源の分散化など近年の電力供給を取り巻く構造の変化を推進するためには、ネットワークの変革が求められる。そこで、本研究では家庭内での配電について、電気通信の進化に倣い、「電力のデジタル化」を提案し、その原理検証を行った。

本研究では、電力のデジタル化の手法として、TCP/IP 網での情報通信に用いるパケットのように電力を適当な単位で分割する「電力のパケット化」を検討した。この方法は、分割された電力に、その電力の量、電圧、直流交流の別、発電した電源の種類、電力を要求している負荷などの情報を付加し、この情報にもとづいて任意の電源から任意の負荷へ配電するものである。これは、電力と情報を統一して取り扱うことを意味している。この方法により、負荷の特性にあった適切な電源からの電力を分配することができ、分散電源の使い分けや需給バランスの調整が可能になる。しかしながら、電力と情報を統一して扱うためには、パケットを生成する変換器において、電力分配に必要な大きさの電力を、情報処理に必要なだけの速度でスイッチングする必要がある。そこで、SiC 半導体トランジスタの高耐圧、大電流密度、高速スイッチング性能に着目し、電力の高速スイッチングが可能であることを実証した。図 1 に 30W の抵抗負荷を 200V、5A の SiC JFET によって 15MHz でスイッチングした場合の波形を示す。この結果をもって、電力パケットの生成および伝送の実証実験を行った。パケット生成と振り分けを行うハードウェアをそれぞれ作成し、2つの電圧源と2種類の負荷（ランプ、ファン）をそれらの装置を介し一組のケーブルでつないだ。電圧源とケーブルの間にはパケット生成装置が、ケーブルと負荷の間にはパケット振り分け装置が接続される。それぞれの負荷にアドレスを割り振り、パケット内の負荷アドレスを参照し正しく負荷にパケットを振り分けられるかを確認した。図 2 に振り分け前後のパケットを示す。A 部および B 部でパケットが切り替わっている。この実証実験をもって、パケットによる電力伝送の実現性が示された。

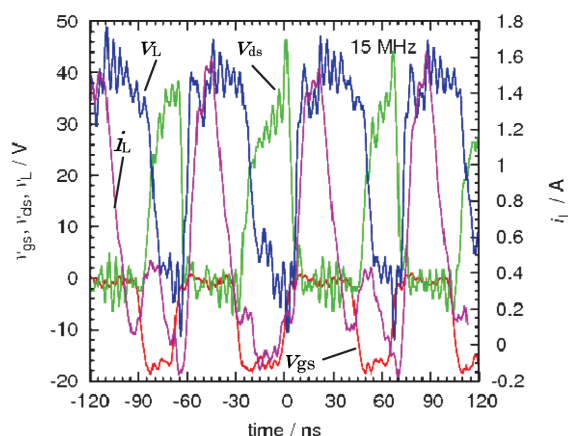


図 1： SiC JFET の 15MHz スwitching 波形

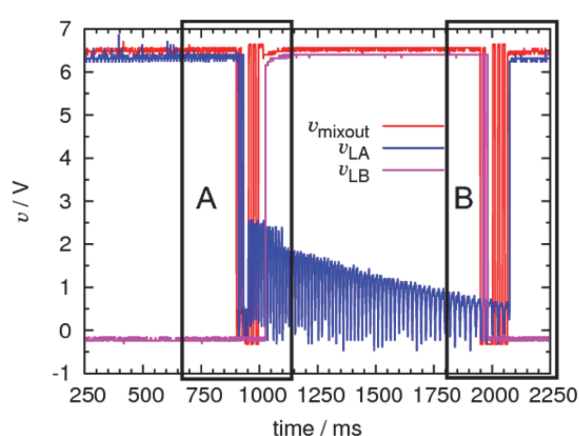


図 2： 電力パケット伝送実験の結果

笹 山 瑛 由 (小林教授)

「ブレイン・マシン・インタフェースに向けた多チャネル脳波計測による脳内情報抽出法および識別法に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年、非侵襲計測法の進展に伴い、ヒトの高次脳機能に関する研究が活発に行われるようになってきている一方、工学分野において末梢神経系、感覚器、運動器などを介さずに、脳とコンピュータ間で直接情報を伝達する技術であるブレイン・マシン・インタフェース (BMI) が注目を集めている。現在の BMI 研究は、抽出しようとしている信号が識別に適した信号であるか否かを検討していないものが多い。そこで本研究では、まず 2 種類の脳波 (EEG) に基づく BMI に関して、多チャネル EEG 計測によって生理学的な見地より検討を行った。一つは、左右手首屈伸運動時およびそのイメージ時における脳波律動、もう一つは定常体性感覚誘発電位に基づく左右示指への注意識別である。その後、左右手首屈伸運動における律動変動に基づく BMI について特定の脳部位の信号を高精度に抽出するため、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) 賦活部位を線形制約とする EEG 空間フィルタに基づく手首屈伸運動の左右識別について検討した。

左右手首屈伸運動時およびそのイメージ時における脳波律動の識別法として、累積分布関数より同定した閾値を用いた左右識別法を提案した。まず、信号を限局するためスプライン・ラプラシアン解析を用いた。その後、ウェーブレット解析による時間-周波数解析を行い、周波数帯域や時間、EEG 電極を同定し、最後に、左右識別の閾値を累積分布関数より取得して識別した。提案手法は、機械学習である従来法よりも識別率は有意に高かった。

定常体性感覚誘発電位に基づく左右示指への注意識別法として、定常体性感覚誘発電位の抽出方法として、狭帯域フィルタ、主成分分析および独立成分分析を用い、得られた独立成分について、定常体性感覚誘発電位マップを評価ベクトルとした評価式による独立成分の同定法を提案し、さらに、同定した独立成分を用いて左右示指への注意識別をする手法を提案した。識別率は現段階では十分高いとは言えないが、本手法による定常体性感覚誘発電位に基づく BMI の構築の可能性が示された。

左右手首屈伸運動時における脳波律動の識別法として、fMRI 賦活部位を線形制約条件とする EEG 空間フィルタに基づく手首屈伸運動の左右識別法を提案した。まず、MRI データより実頭部ボクセルモデルを作成した。次に、左右手首屈伸運動時の fMRI 計測を行い、得られた fMRI 賦活領域を線形制約とする、線形制約付きプリホワイトニング空間フィルタを設計した。最後に、同空間フィルタで推定された事象関連同期・脱同期の信号強度を fMRI 賦活領域内で推定し、これを特徴量として左右識別した (図 1)。この提案手法は、EEG データのみを用いて識別する従来の手法よりも識別率が有意に高いことから、EEG に加え MRI および fMRI のデータを複合的に用いることで、識別率が向上することが分かった。

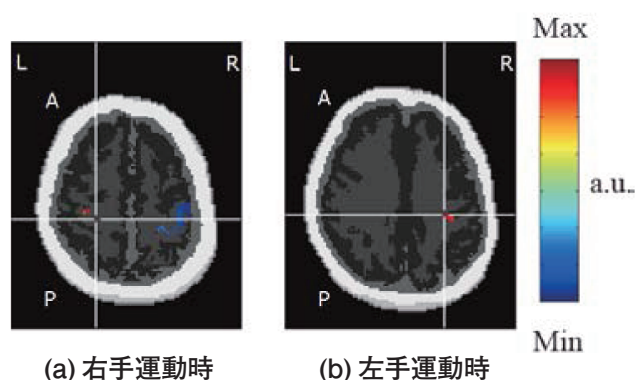


図 1: β 律動の信号源推定結果

小 西 武 史 (雨宮教授)

「直流電気鉄道における電力需給システムの高度化に関する基礎研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

本研究では、直流電気鉄道における電力需給システムの高度化を実現するため、電力の需要側と供給側に対する新技術の適用を検討した。需給側からのアプローチとして、同期トルクと非同期トルクの両立が可能で高効率、高トルク密度、高出力、定トルクに近い垂下加速特性、過負荷に対して乱調や脱調しにくい安定した出力特性など、既存の回転機では実現できない高性能化ならびに高機能化が達成できる高温超伝導誘導 / 同期電動機 (HTS-ISM) について、電車主電動機適用時の特性を明らかにした。供給側からのアプローチとして、電車線の電圧降下補償、回生エネルギー有効利用などの電力供給システムの高品質化、省エネルギー化を実現できる地上用電力貯蔵システムについて、解析、実証試験を通じてその特性を明らかにした。

供給側である主電動機の検証においては、各電動機の回路定数を求め、電車の主電動機に適用した際の入力電力と電力損失 (効率) を推定した。まず、ある直流電気鉄道の電力負荷特性から、直流直巻電動機 (DCM) を主電動機に適用した際の電車走行時のトルク、電力損失などの各特性を類推した。次に、そのトルク特性を得るために、異なる電動機 (一般的な常温かご形誘導電動機 (N-IM)、HTS-ISM) を適用した場合に必要な回路定数を設定した。HTS-ISM に関しては高温超伝導体の電磁現象から考えられる超伝導電動機の回転原理をもとに等価回路を導くことにより、トルク特性を得た (図 1)。各電動機の入力電力を比較すると、電力損失に関しては HTS-ISM が最も小さくなることを定量的に示した。その結果、HTS-ISM の電車主電動機への適用により、力行電力の抑制効果、回生エネルギーの増大効果が得られることを示した。

需要側である電力貯蔵システムの検討では、電力貯蔵媒体として電気二重層キャパシ (EDLC) を想定し、電力貯蔵システムを過渡解析モデルによる計算、ミニモデルによる基礎試験、実証試験を通じて検証した。だが、電力貯蔵システムの充放電制御は、電車線の電圧が「充電開始電圧」を上回ると充電、「放電開始電圧」を下回ると放電する方式 (固定電圧制御) が当初適用されていたため、必ずしも適切な充放電特性が得られるとは限らなかった。そこで、「充電開始電圧」と「放電開始電圧」を電力貯蔵媒体の充電状態に応じて変動させることによって、電力貯蔵システムが充電と放電の何れの動作にも常に対応できるように機能する制御手法 (可変電圧制御) を提案した。

本研究のまとめとして、電力貯蔵システムと、HTS-ISM の両者を直流電気鉄道に導入した場合の省エネルギー効果を、電力シミュレーションを用いて評価した。電動機の相違 (N-IM と HTS-ISM)、電力貯蔵システムの有無、充放電制御手法の相違 (固定電圧制御と可変電圧制御) による使用エネルギーと電圧変動を比較した (図 2)。その結果、現状の制御手法を改良した電力貯蔵システムを適用することにより、回生エネルギーのさらなる活用が見込まれ、かつ HTS-ISM の導入により 3 ~ 4% 程度の省エネルギー効果が発揮されることを示した。同時に、HTS-ISM と可変電圧制御を適用した電力貯蔵システムの適用により、系統の標準直流電圧を 2 ~ 7% 改善する効果を示した。

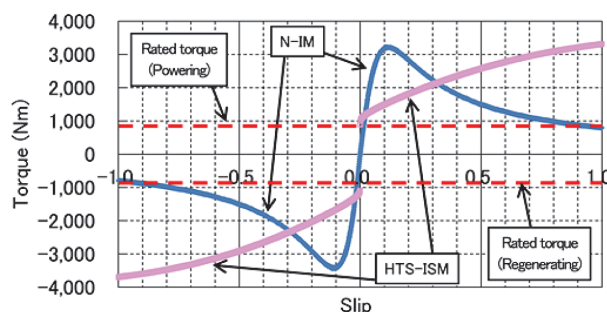


図 1 N-IM、HTS-ISM のすべりトルク特性の解析結果

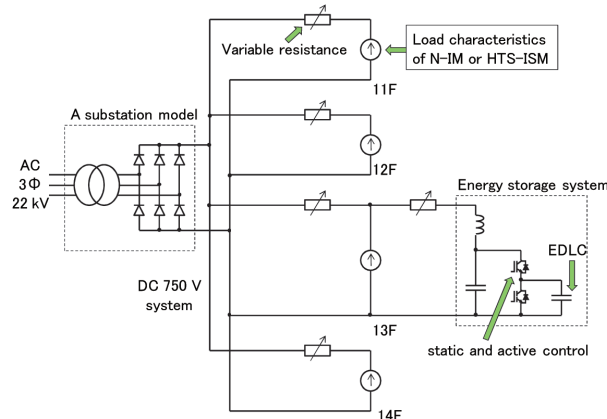


図 2 全体システムの検証回路構成

占 部 継一郎 (高岡教授)

「Spectroscopic Study of Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure」
(大気圧誘電体バリア放電の分光学的研究)

平成 24 年 3 月 26 日 授与

大気圧下で低温プラズマを生成することにより、従来の低圧プラズマ材料プロセスの大幅なコストカットが実現し、さらに液体やバイオマテリアルに対するプロセスが可能であることから、世界中で大気圧プラズマに関する研究が精力的に進められている。また、近年新しい学術分野としてプラズマ医療工学の研究も開始されるなど、今後も本分野の研究は拡大が続けると考えられる。本論文では種々の大気圧プラズマ生成法の中で空間均一性・熱非平衡性（ガス温度が上昇しない）に優れた誘電体バリア放電を研究対象とし、分光学的手法によるプラズマパラメータの診断や放電機構の解明、さらには解明したメカニズムを応用した放電状態の制御法の研究を行った。（図 1）

大気圧下で安定したプラズマを生成するには、パッシェンの法則に従い放電空間を mm オーダ以下にする必要がある、分光測定においてもサブ mm の空間分解能が必要となる。本研究では十分な時空間分解能が得られるレーザ吸収分光法やレーザ誘起蛍光法、CO₂ レーザヘテロダイン干渉計などを用い電子や励起粒子の時空間分布測定結果から誘電体バリア放電の放電機構を明らかにした。また、広帯域かつコヒーレントな光源である光周波数コムを用いた新規分光計測法の研究開発も並行して進め、アルゴン準安定励起原子の吸収スペクトル測定に成功した。

上記の研究結果を基に、不安定なフィラメント状放電となる傾向が強いアルゴンガス中での誘電体バリア放電を、有機・無機分子の添加により安定なグロー状放電に遷移させた。（図 2）2つの放電状態間の遷移現象には非線形性の存在が示唆され、近年報告が相次いでいる大気圧放電中の非線形現象（自己組織化・カオス）の 1 種であると考えられる。このように、大気圧プラズマはプロセス用プラズマ源として魅力的であると同時に、反応拡散系非線形現象のモデル実験としても非常に有用であり、今後この分野における研究の発展も大いに期待される。

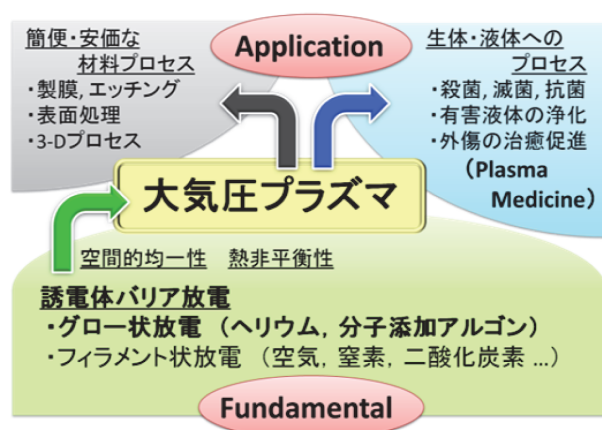


図 1：大気圧プラズマ研究の展開と本論文の研究対象である誘電体バリア放電の位置づけ

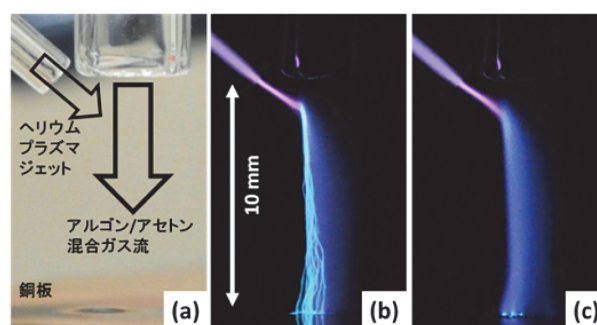


図 2：アルゴンガス流中誘電体バリア放電のアセトン添加率 A による放電形態制御
(a) 装置構成 (b) フィラメント状放電 A = 0.15%
(c) グロー状放電 A = 0.55%

奥村 宏典 (木本教授)

「Formation Mechanism of Extended Defects in AlN Grown on SiC {0001} and Their Reduction by Initial Growth Control」

(SiC{0001} 基板上に成長した AlN 層の拡張欠陥の生成機構と初期成長制御によるその低減)
平成 24 年 3 月 26 日授与

殺菌や化学分析装置の小型化・低消費電力化に向けて、深紫外発光デバイスが着目されている。深紫外発光用材料として、禁制帯幅 6.0 eV (波長 207nm 相当) を有する直接遷移型半導体の AlN が有力である。AlN 成長には、格子定数差の小さい ($\sim 1\%$) SiC が最適な基板の一つである。しかし、SiC{0001} 基板上 AlN 成長層には、高密度の貫通転位 ($\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) や、積層不整合境界 (SMB) と呼ばれる面欠陥が発生する。高効率の深紫外発光デバイスの実現には、AlN 層中の欠陥低減が不可欠である。

本論文は、分子線エピタキシ (MBE) 法を用いた、ステップ高さを制御した SiC{0001} 基板上への高品質 AlN の結晶成長、および透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた AlN 層の欠陥評価について報告している。以下に示すように、大面積 SiC{0001} 基板上への高品質 AlN 成長方法を提案し、実際に、現在報告されている中で最高品質の薄膜 AlN 成長に成功した。また、MBE 法による低温 (650°C) AlN 成長においても、非常に優れた光学特性が得られることを初めて示した。本論文は、新たな高品質 AlN 成長方法を提案するものであり、深紫外発光デバイス研究開発の新たな方向を示すものである。

1. 高温水素ガスエッチングによる SiC{0001} 基板表面のステップ高さ制御

ガスエッチング条件や基板オフ方向の異なる表面を詳細に観察・制御し、6H-SiC (0001) では、2 インチウエハの 30% 領域で 6bilayer (図 1 (a))、全面で 3bilayer 高さのステップを均一に得ることができた。

2. 2H-AlN (0001) 層中の拡張欠陥の詳細な観察

SiC 基板のステップ端で発生する SMB や貫通転位列の高分解能 TEM 観察を行い、発生機構を詳細に調べた。また、SiC 上 AlN 層の臨界膜厚が予想を大きく上回る 700 nm 以上であることを明らかにした。

3. 初期成長制御による高品質 2H-AlN {0001} 結晶成長

Ga を AlN 成長直前に 2 原子層照射し (サーファクタント効果)、かつ窒素プラズマ点灯直後に AlN 成長を開始することで、AlN 層の貫通転位密度を約二桁 ($4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$) 低減することに成功した (図 1 (b))。

4. 高品質 2H-AlN (0001) 層の光学特性

AlN 層の低温 PL 測定を行ったところ、非常に鋭い自由励起子ピーク (7.1 meV) が得られた (図 2)。

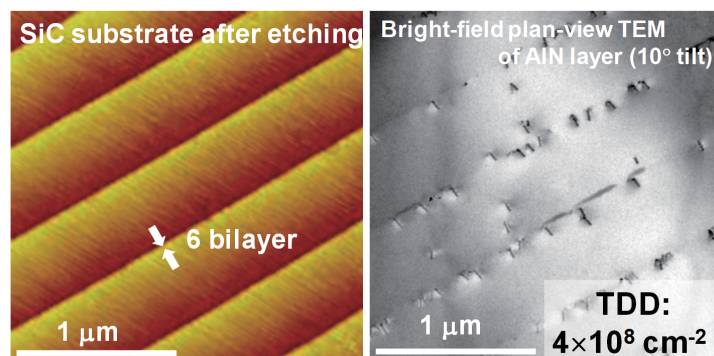


図 1 : (a) 高温水素ガスエッチング後の 6H-SiC (0001) 基板の表面モフォロジー。(b) 6H-SiC (0001) 基板上に成長した厚さ 300 nm の AlN の平面 TEM 像。

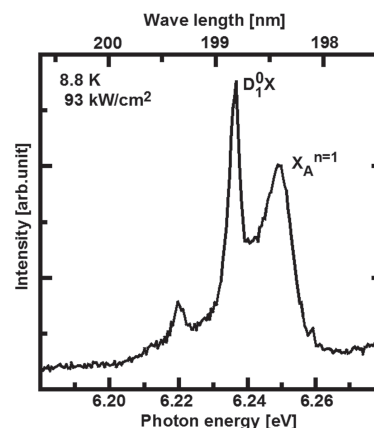


図 2 : AlN の低温 PL 測定結果。

三宅 裕 樹 (木本教授)

「Interface Control of AlGaN/SiC Heterojunction and Development of High-Current-Gain SiC-Based Bipolar Transistors」

(AlGaN/SiC ヘテロ接合界面制御および高電流増幅率 SiC 系バイポーラトランジスタの実現)

平成 24 年 3 月 26 日授与

本論文は、次世代大電力変換用半導体素子として期待される、SiC バイポーラトランジスタ (BJT) に関する研究をまとめたものである。特に、BJT の電力変換効率を決める最重要指標、電力増幅率の向上に重点を置いている。本論文では、デバイス設計、エピタキシャル成長、デバイスプロセスの観点から研究を行い、過去最高の電流増幅率 (>250) と耐圧 ($>17\text{kV}$) を実現した。また、さらなる電流増幅率向上に向けて、III 族窒化物半導体 (III-N) をエミッタとして用いた、III-N/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) についても研究を行っている。SiC 上への III-N の成長、III-N/SiC 界面制御、デバイスプロセスの構築を行い、世界で初めて III-N/SiC HBT のエミッタ接地電流増幅動作を実現した。

既存の電力変換素子は、Si ベースのパワー半導体 (例えば MOSFET や IGBT) が用いられている。これらは、高性能かつ低コストであり、現在のパワーエレクトロニクスの一翼を担っている。しかしながら、その変換効率や動作温度にはある程度の限界があり、Si 半導体そのものの物性値からきまる理論限界を超えることはできない。そこで、特にパワー素子用半導体として、優れた物性を有する、SiC を用いたトランジスタへの期待が高まっている。パワー素子には様々な形態があるが、本論文では、1-10kV クラスの電力変換で有望なバイポーラトランジスタを選択している。理論的には優れた特性が期待される SiC BJT であるが、素子の損失を決める、電流増幅率の値が極端に小さく、実用化には至っていない。

上記問題を解決すべく、(1) SiC BJT のエピ方法の工夫による界面再結合低減、(2) p-SiC ベース中の深い準位を低減するプロセスを用いたバルク再結合低減、(3) 表面保護膜の形成手法検討による表面再結合低減、を考案し、過去最大の電流増幅率 257-439 を実現した。また空間変調 JTE と呼ぶ、素子端部での電界緩和構造を設けることで、過去最高耐圧 17kV を実現した。

さらなる電流増幅率向上に向けて、AlGaN をエミッタとして用いた AlGaN/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタに関する研究も行った。AlGaN/SiC 界面をいかに作るかが、AlGaN/SiC HBT の性能を左右する最も重要なポイントであり、(1) SiC 上への AlGaN 成長方法の工夫、(2) AlGaN/SiC 界面のバンドアライメント制御、(3) AlGaN/SiC 界面の電流輸送機構を詳細に研究した。結果、AlGaN/SiC HBT として世界初となるエミッタ接地電流増幅動作 (増幅率 >10) を達成した。

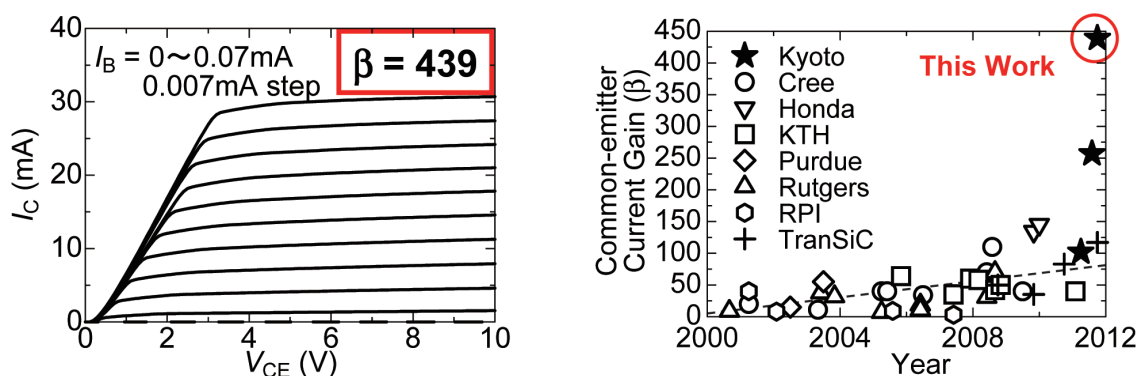


図 (左) 作製した SiC BJT の電流電圧特性 (右) 作製した SiC BJT の電流増幅率のベンチマーク

梅 田 健 一 (松重教授)

「周波数変調 AFM による固液界面における静電相互作用力の解明およびその表面電荷分布計測への応用」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年のリソグラフィーを始めとする微細構造加工する技術の急速な発展により、高度情報化社会が形成され、人々の生活スタイルが大きく様変わりしてきている。一方で、こうした top-down 的な手法では微細構造作製に限界が近づいてきており、電析や生体分子の自己組織化現象など溶液中における特異な現象を生かした bottom-up 的なデバイス開発手法に注目が集まっている。近年、低雑音・低振幅モードの採用により、周波数変調型の AFM (Frequency Modulation Atomic Force Microscopy: FM-AFM) は液中環境下においても超高真空中と同様に試料表面の構造を原子・分子スケールで実空間計測することが可能であることが明らかとなった。この手法を更に発展させ、溶液中においても真空中と同様に表面電位・物性計測が可能にすることで、次世代のデバイス開発のための基盤技術を確立することが可能であると考えられる。本論文では固液界面における FM-AFM を用いた局所電荷密度分布計測手法の開発を目的として研究を行った。

超高真空中では、探針 - 試料間に交流電圧を印加することによる、ケルビンフォース顕微鏡 (Kelvin Probe Force Microscopy: KPFM) を用いることで、試料表面の表面電位分布を原子・分子スケールで可視化することが明らかとなっているが、溶液中において同様の測定を行ったという報告は未だなされていない。この手法を直接応用することを試み、実験結果の詳細な解析を行った結果、表面張力による寄生振動および電気二重層による AC 電場の遮蔽効果によって、溶液中では KPFM と同様の方法では局所表面電位計測が不可能であることを明らかにした。一方で、これらの原理を利用することで、ピエゾ励振法に見られる液セルやホルダーによる寄生振動を生じない静電励振法や高周波静電気力励振法の開発に成功した。図 1 に示すように静電励振法を用いて溶液中において明瞭な原子像を得ることができることを明らかにした。

更に上記の知見を取り入れることで、探針と試料表面に存在する拡散二重層の重なりにより生じる電気二重層力を用いた局所電荷分布計測の開発を行った。図 2 に開発を行った光熱励振法実験セットアップを示す。カンチレバーの熱的に励振することで寄生振動の問題を解消し、定量的な力計測が可能にしようとした。この装置を用いて DNA 分子が固定化された poly-L-lysine がコートされた白雲母表面上において周波数シフトマップ測定を行い局所的な電気二重層力計測を行った。その結果得られた DNA 分子上での電荷密度は理論値である 0.15 C/m^2 とほぼ同じ値であることが分かった。本研究において、FM-AFM を用いた固液界面における分子スケールでの電荷密度計測手法の開発に成功した。

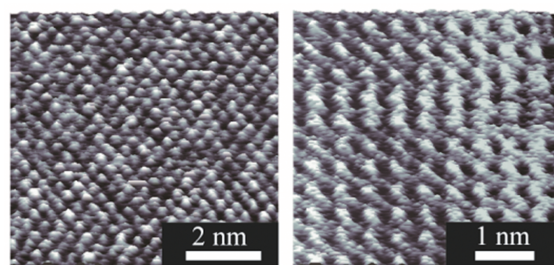


図 1：静電励振法を用いた KCl 水溶液中での原子像観察、(a) 白雲母、(b) 塩化カリウム。

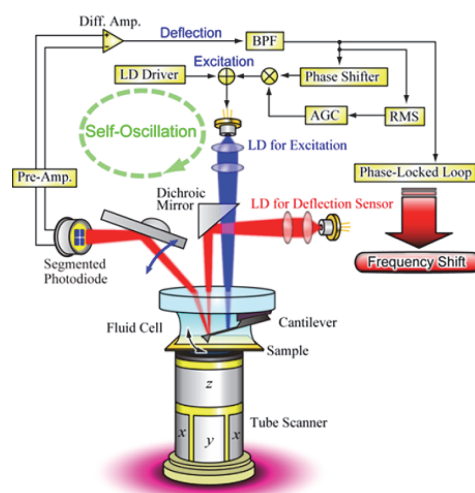


図 2：開発を行った光熱励振法セットアップ。

鈴木 一 博 (松重教授)

「3次元フォースマッピング法による固液界面の分子スケール構造物性評価」

平成 24 年 3 月 26 日授与

固液界面は近年注目を集めている。プリンタブルエレクトロニクス分野においては、デバイスを低コストで作製可能であるという利点から、液体を基板上に滴下し配線やトランジスタを作製する技術の研究が行われている。その際、液体の基板への濡れ性の制御が重要となるが、濡れ性は基板の親疎水や固液界面近傍に形成される溶媒和構造と関連する。固液界面近傍にはそれだけではなく電気二重層が形成される。帯電した表面近傍に対イオンが引き寄せられ、バルク中よりイオン濃度が高い領域を電気二重層と呼び、そこへは電気エネルギーの貯蔵が可能であり、その性質を利用した蓄電デバイスの研究が盛んに行われている。上記の研究には、溶媒和構造や電気二重層のナノスケールでの局所的な評価をする手法が必要とされているが、十分な評価手法が確立していないのが現状である。本論文は液中動作周波数変調検出方式原子間力顕微鏡（液中 FM-AFM）を用いた固液界面の溶媒和構造と電気二重層の評価に関する研究成果である。

液中 FM-AFM で探針に働く溶媒和力や電気二重層力を正確に測定することで、固液界面の溶媒和構造や電気二重層をナノスケールで評価することを提案した。カンチバールの励振方法には圧電励振法や光熱励振法があるが、後者を採用することで、正確な力の測定が可能であることを示した。図 1 に開発した光熱励振法を用いた液中 FM-AFM の装置構成を示す。親水性基板の白雲母上の水和構造と疎水性基板であるグラファイト上のそれを比較した。フォースマッピング測定を行った結果、白雲母表面上の水和構造は白雲母の表面構造に依存した面内方向に不均一な構造を有する一方で、グラファイト上においては面内方向には一様な水和構造が形成されることが確認された（図 2）。この結果は水分子が強く吸着するサイトがグラファイト上には存在しないことを示す。

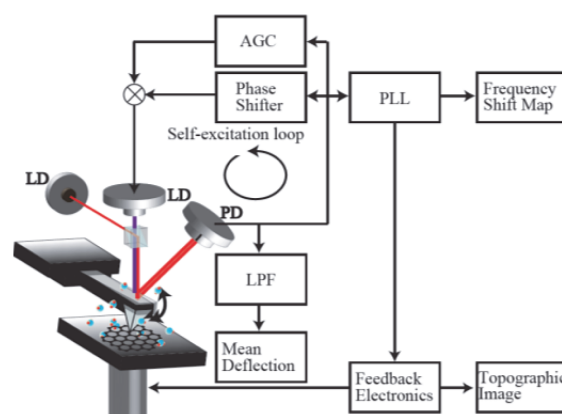


図 1：光熱励振法を用いた FM-AFM の装置構成。

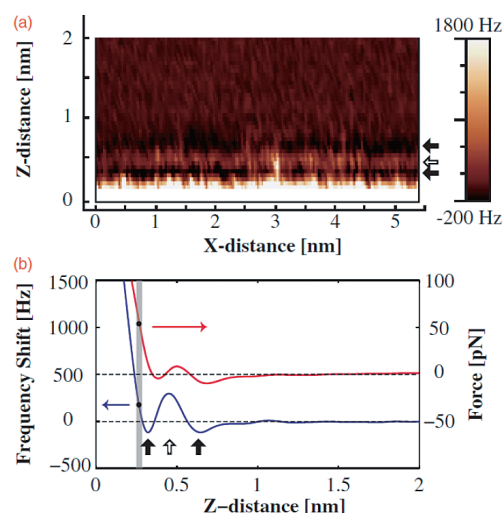


図 2:(a) 超純水 / グラファイト界面でのフォースマップ。矢印は面内方向に一様な水和構造を示す。(b)(a) を面内方向に平均化したカンチバールの共振周波数変化 - 探針試料間距離曲線とそれを探針に働く力に変換した曲線。

服 部 真 史 (松重教授)

「二酸化チタンナノチューブ光触媒を用いた水素生成・分離一体型メンブレンの開発」 平成 24 年 3 月 26 日授与

化石燃料の枯渇化や、地球温暖化といった地球規模でのエネルギー問題が深刻化している中、化石燃料に代わるクリーンエネルギー源として水素エネルギーが期待されている。しかし、水素エネルギー社会の実現には多くの課題があり、その中のひとつに水素の運搬・貯蔵に大掛かりな設備が必要であることが挙げられる。この問題の画期的な解決策として水素を運搬するのではなく、オンサイトで適時必要な水素を製造する小型の水素改質器が考えられる。しかし、このような小型水素改質器開発に向けても問題が多く、最も大きなものに水素製造において、水素の発生と副生成物からの高純度化を行う機構が別々に必要となり、水素製造装置全体が大型化してしまう問題がある。

一方、本研究室では水素製造技術のひとつとして二酸化チタン (TiO_2) 光触媒を用いた光分解水素生成に着目して研究を進めてきた。そして、これまでに得られた光分解水素生成に関する知見から TiO_2 光触媒を用いた水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールの着想を得た。この水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールは、従来の水素製造装置の問題を克服した、液体燃料から高純度の水素をオンサイトで生成する小型改質器への応用が期待できる。

本論文では、将来の携帯型水素エネルギー源の開発に向け、このような高機能モジュールの実現を目指した研究について記述をしている。

TiO_2 光触媒を用いた水素生成と分離を同時に行う高機能モジュールとして最適な構造として、図 1 に示すような、酸化チタンナノチューブアレイ (TNA) と Pd 水素分離膜を一体化した構造を考案した。そして、実際にこのような構造を作製する手法として、TNA 表面上に形成した Pd を剥離することで、Pd 膜表面上に TNA を転写する手法を独自に考案し、TNA/Pd 二層構造の薄膜の作製に成功した。また、実際に作製した薄膜を用いてメタノール、エタノールの光分解によって純度 100 % の高純度の水素を抽出することに成功した。図 2 にその結果を示す。また、TNA の物性に関する詳細な評価に向けた研究として、新たに単一酸化チタンナノチューブ (TNT) の電極間架橋構造の電流 - 電圧特性から、単一 TNT の移動度の評価手法を確立した。

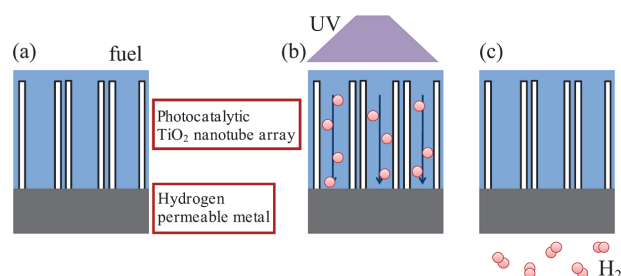


図 1 : (a) TNA 光触媒と Pd 水素透過性金属膜の二層構造. (b) TNA 光触媒部での水、アルコールの光分解による水素、プロトンおよび副生成物の生成. (c) Pd 水素透過性金属による水素の高純度化.

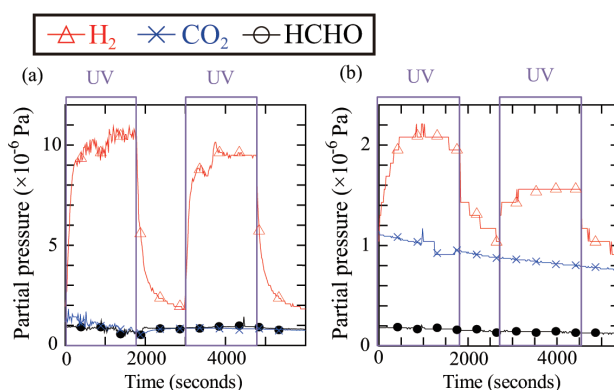


図 2 : TNA/Pd 薄膜を通過した各種生成ガスの分圧変化. (a) メタノール光分解時. (b) エタノール光分解時.

岩 橋 清 太 (野田教授)

「フォトニック結晶レーザの共振特性に与える格子構造の包括的解析と機能性向上」

平成 24 年 3 月 26 日授与

フォトニック結晶レーザ (図 1 (a)) は、2 次元大面積発振を特徴とする半導体レーザであり、従来は実現困難であった単一モード高出力動作やビーム出射方向の制御、多様なビーム形状の生成が可能であるなど、次世代の半導体レーザとして期待されている。本論文は、フォトニック結晶レーザの共振特性を決定する根本原理である格子構造に着目し、それらの包括的解析と機能性の向上に向けた検討を行った結果をまとめたものである。

まず、格子構造に対する共振特性の本質理解のために、その対称性に着目し、解析を行った。従来用いられてきた格子構造は、正方格子と三角格子であったが、より一般化した面心長方格子を基本として、格子構造の変化に伴う様々な共振特性の振る舞いを理論・実験双方から系統的に解析した [1]。図 1 (b) は作製した面心長方格子構造の電子顕微鏡像であり、格子角度 θ をパラメータとすることで、従来の正方格子 ($\theta = 90^\circ$) や三角格子 ($\theta = 60^\circ$) も含め、共振特性の包括的な理解が可能となる。その結果、モード縮退の物理的解釈やモード結合のメカニズムなど、格子構造に対する共振モードの本質が明らかとなり、また対称性を考慮することで、高次の偏光分布を有するビーム形状の生成にも成功した [2] (図 2)。

一方で、格子構造の一般化により、設計自由度は、従来の限定された格子範囲に比べ格段に拡がり、様々な機能性向上の検討も行われた。フォトニック結晶レーザの単一モード発振の更なる安定化・高出力化に向けて、より幅広い最適設計が可能となり、室温にて世界最高である出力 2W の単一モード高出力動作に成功した。また、ビーム出射角制御において、格子を二重に組み合わせる従来の方式を、単一格子にて実現し、より簡便な設計指針を示した。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの共振モード形成の物理的な理解を与えると同時に、応用に向けた様々な機能性の向上にも成功しており、今後の半導体レーザの進展に大きく貢献するものと期待される。

参考文献

- [1] S. Iwahashi, K. Sakai, Y. Kurosaka, and S. Noda: "Centered-rectangular lattice surface-emitting photonic-crystal lasers", Physical Review B, vol. 85, no. 3 035304 (2012).
- [2] S. Iwahashi, Y. Kurosaka, K. Sakai, K. Kitamura, N. Takayama, and S. Noda: "Higher-order vector beams produced by photonic-crystal lasers", Optics Express, vol.19, no. 13 11963-11968 (2011).

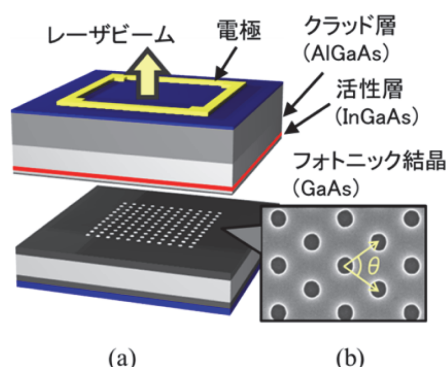


図 1 (a) フォトニック結晶レーザの模式図
(b) フォトニック結晶の電子顕微鏡

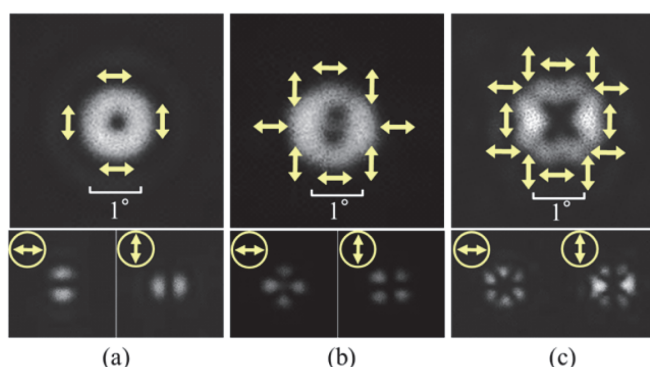


図 2 フォトニック結晶レーザの出射するビーム形状と偏光状態 (a) 基本次 (b) 2 次 (c) 3 次の偏光分布

瀧 川 信 一 (野田教授)

「複素平面波展開法を用いたフォトニック結晶レーザの解析に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

本論文は、次世代光源として期待されるフォトニック結晶レーザにおいて、フォトニック結晶特性とレーザ利得／損失を統一的に扱うデバイス解析／設計法について検討した結果をまとめたものである。

フォトニック結晶は周期的な誘電率分布を有する構造体であり、光を自在に制御することができる。このフォトニック結晶と半導体レーザを組み合わせたフォトニック結晶レーザは、大面積コヒーレント動作が可能であり、発振波長／放射ビーム形状が制御された高出力光源として注目されている。従来、フォトニック結晶自体の解析や設計には、フォトニック結晶を構成する材料の誘電率実部を用いて行われ、周波数分散特性（フォトニックバンド構造）等のフォトニック特性が示されてきた。しかし、フォトニック結晶レーザ内部には光に対する利得や損失が存在するため、誘電率虚部の周期的変化を無視することはできない。このためフォトニック結晶レーザの設計においては、利得／損失を含めてフォトニック結晶の解析を行うことが必要である。

そこで本論文では、複素誘電率を用いた平面波展開法を構築することによりフォトニック結晶レーザの解析方法を確立した。この特徴は、レーザ素子中を伝搬する光のフォトニックモードに対し、周波数分散特性だけでなく、利得／損失分散特性（図 1）も用いてデバイス特性を論じることにある。また見通しの良い解析式を基本にしており、計算が比較的容易である。加えて、フォトニック結晶からの放射解析式を平面波展開法に組み入れることで、出力特性も検討できるようにした。これらを用いたフォトニック結晶構造最適化により高利得（低閾値）と高放射が両立したレーザ構造を示すことに成功した。本手法を用いて赤外およびテラヘルツ帯のフォトニック結晶レーザに対して特性計算を実施し、実験との比較で検証した。

更に、非等方性媒体を用いたフォトニック結晶レーザに本手法を展開することを試みた。非等方性誘電率の扱いは、屈折率楕円体の考え方を複素平面波展開法に導入することで可能にしている。この解析手法を緑色光源用材料として注目されている無極性窒化物半導体を用いたフォトニック結晶レーザに適用し、フォトニック特性の非等方性利得方向依存性を明らかにした（図 2）。また非等方性利得の存在による特性変化はフォトニック結晶構造の形状変更で補償できることを示した。

以上の成果は、フォトニック結晶レーザの低閾値化／高出力化などの性能向上を可能にするだけでなく、今後の新たな光デバイスにも展開することができる。

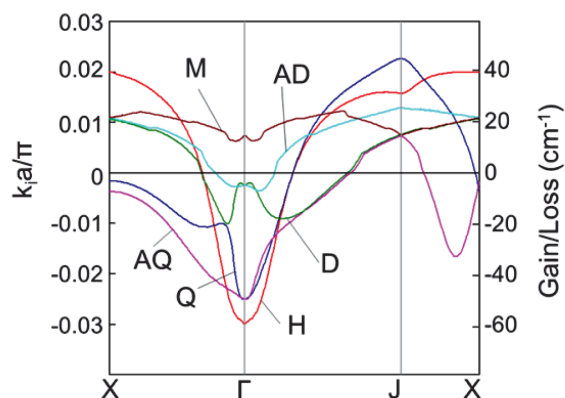


図 1：フォトニックモードの利得／損失分散特性（三角格子、縦軸負値が利得）

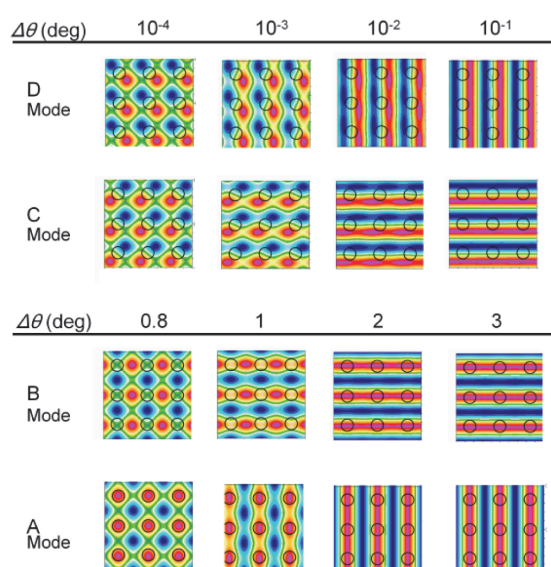


図 2：電磁界分布の非等方性利得方向依存性（ $\Delta\theta$ は Γ M 方向と高利得方向が成す角）

Menaka De Zoysa (野田教授)

「Thermal Emission Control by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals」

(量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトニック結晶を用いた熱輻射制御)

平成 24 年 3 月 26 日授与

物体を熱することにより発せられる熱輻射は、一般に、極めて広いスペクトルをもつことが知られている。例えば、太陽光スペクトルは、約 5800K の黒体からの熱輻射スペクトルに近く、紫外から赤外に至る極めて広い波長スペクトルをもつ。この広いスペクトルのうち、我々は、通常、一部の波長成分のみを利用し、その他の成分は無駄に捨ててしまう。最近注目を集めている太陽電池においては、広い太陽光スペクトルには、太陽電池が吸収して電力に変換できない波長成分が多く存在するため、一般に光電変換効率は 10~20% 程度に留まっている。ここで、もし太陽光スペクトルそのものを、エネルギー損失なく、狭いスペクトルへと変換・集中できれば、利用可能なエネルギー成分が増大し、発電効率の大幅な改善が期待される。一般には、物体からの熱輻射スペクトルを、エネルギーの損失なく、狭帯域の所望のスペクトルへと変換・集中できれば、上記、太陽光発電の高効率化のみならず、廃熱等を利用した熱光発電、高効率ランプ、各種分析用高効率赤外光源の実現が期待される。

加熱された物質が、通常非常に広い熱輻射スペクトルを示すのは、物質中の電子と光子の運動が制限されていないためである。そこで、必要な周波数のみに、電子と光子の運動を限定できれば、その周波数でのみ熱輻射が起こると考えられる。本研究では、電子の運動を、半導体量子井戸の離散化準位間の遷移（サブバンド間遷移）を用いて限定し、次に、光子の運動を、フォトニック結晶のバンド端共振器モードを用いて限定することによって、極めて狭い周波数帯域に熱輻射を集中できることを見出した[1]。

具体的には、量子井戸層に円孔三角格子フォトニック結晶を導入し、中赤外線の波長 10 μm 付近に狭い熱輻射が得られるような光源を作製した (図 1a)。本デバイスおよび同じ構造でフォトニック結晶に相当する部分が黒体である参照試料に、それぞれ 11.2 mW の電力を投入して加熱した際のスペクトル (図 1b) を示す。本デバイスでは輻射帯域が黒体と比べて非常に狭く ($\sim 1/30$) 限定できていることが分かる。また、本デバイスは輻射帯域制限の結果、同一の電力を与えた場合のデバイス温度が参照試料と比べて大幅に上昇し、その結果、4 倍以上の高いピーク強度を示している。言い換えると、本デバイスでは与えられた電力が狭い帯域に集中し、他の帯域で消費されないという状況になっており、エネルギーを効率よく利用できていると言える。この効果は初めに述べたような太陽光発電の効率向上や各種センサー用光源に応用可能である。

[1] De Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda: "Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling", Nature Photonics, vol.6, pp 535-539 (2012).

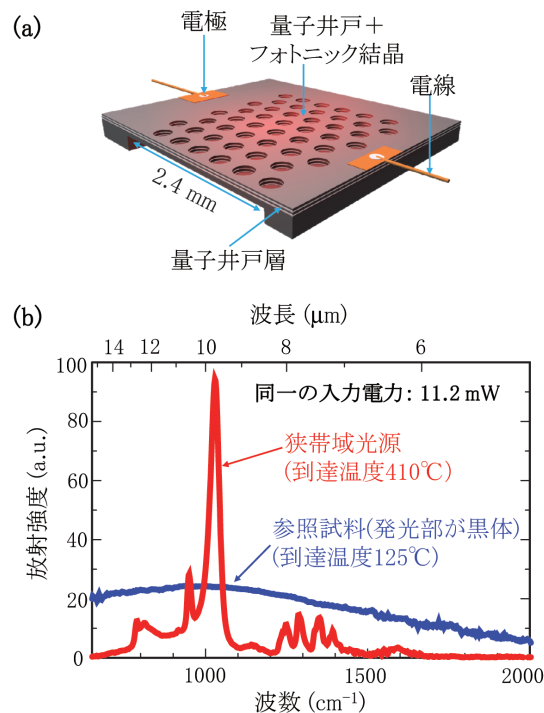


図 1: (a) 熱輻射光源構造, (b) 輻射スペクトル

池之上 卓 己 (藤田教授)

「超音波噴霧法による薄膜形成と有機薄膜太陽電池への応用に関する研究」

平成 24 年 3 月 26 日授与

昨今のエネルギー問題を解決する手段として光電変換は注目を集めており、期待されている材料の一つに有機半導体が挙げられる。しかし、これまでの研究は新規の材料探索に力が注がれており、成膜技術に関する研究は見受けられなかった。また、真空や複数のプロセスでデバイスを作製するという応用上の問題を抱えていた。本研究は、有機半導体を超音波噴霧法という非真空プロセスで高品質に成膜し、透明導電層などの無機半導体も含めて単一プロセスでのデバイス作製を実現することにより、エレクトロニクスの進展に寄与することを目指したものである。

本研究では、まず、太陽電池応用に適した透明導電膜を目指し、ZnO および ITO 薄膜を作製した。これら薄膜の成膜条件から成膜メカニズムについて明らかにし、添加剤が薄膜の結晶性向上や抵抗率低下に良い効果をもたらすことを示した。その結果、大気圧下では最低水準の抵抗率を有する ZnO:Ga および ITO 薄膜を実現した。

また、超音波噴霧法を有機半導体へ適用し、水分散系である PEDOT:PSS および、有機溶媒に可溶な P3HT、PCBM の薄膜を作製した。これら超音波噴霧法で作製した薄膜が、従来用いられているスピコート法で作製した薄膜と比較して、幅広い膜厚制御性があること、良好な電気特性を示すこと、平坦な表面を有することを示した。また、超音波噴霧法を用いることで積層構造を容易に作製可能なこと、リソグラフィレスでパターニングが行えることを実証し、デバイス応用に有利な点が多いことを示した。

さらに、これらの結果を総合して、デバイス応用を行った。まず、ZnO/ZnMgO/PEDOT:PSS 構造を有する Schottky 型の紫外線検出器を作製した。このデバイスは、高い感度比と外部量子効率を示す高性能なデバイスで、真空プロセスで作製したデバイスと同等の性能を簡易に単一プロセスで実現した。また、Glass/TCO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/TiO_x/Al 構造の有機薄膜太陽電池を作製し、スピコート

法で作製したデバイスより高い変換効率を有するデバイスを実現した。特に超音波噴霧法で作製した有機薄膜太陽電池は、高い短絡電流密度を有しており、作製条件の最適化でさらなる特性向上も期待できる。

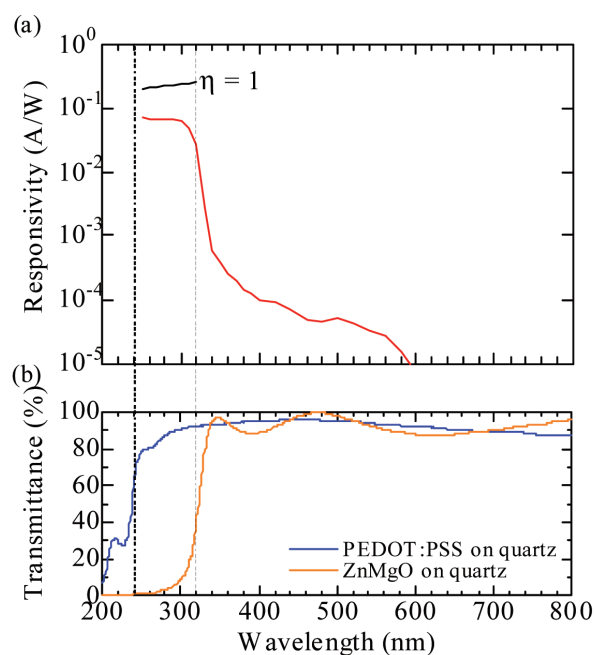


図 1 ZnO/ZnMgO/PEDOT:PSS 構造を有する紫外線検出器の外部量子効率波長依存性 (a) と ZnMgO, PEDOT:PSS 薄膜の透過スペクトル (b)

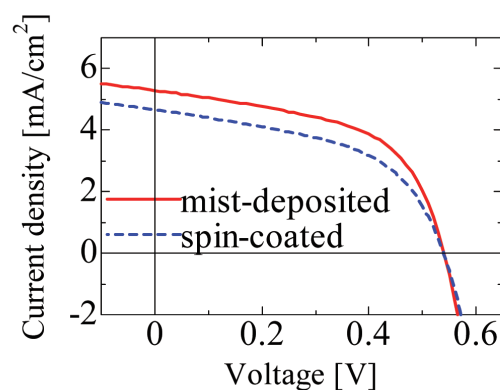


図 2 PEDOT:PSS 層を超音波噴霧法およびスピコート法で成膜した有機薄膜太陽電池の J-V 特性

吉 田 誠 (吉田教授)
「広帯域マルチキャリア無線伝送技術に関する研究」
平成 24 年 3 月 26 日授与

平成 22 年末、ITU-R において第 4 世代移動通信システム (IMT-Advanced) として LTE (Long Term Evolution) -Advanced と WiMAX2 が適合規格であることが報告された。また、これに先立ち LTE や WiMAX が商用サービスされており、これらの次世代移動通信システムは下りリンクにおいて全てマルチキャリア伝送方式の一つである OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いている。本論文は、移動通信システムのさらなる広帯域化および高品質化を目指した著者の第 4 世代移動通信システム向けマルチキャリア無線伝送技術に関する研究をまとめたものである。

第 4 世代移動通信システムは高速移動時に 100Mbps 以上の伝送速度が要求されると同時に、セルラシステムとしての面的なサービスやグローバル環境での使用を前提としなければならない。限られた周波数資源においてユーザの利便性の向上を図るためには、ピーク伝送速度を規定する下りリンクのセルラ平均周波数利用効率 [bps/Hz/cell] を最大化する多重伝送方式の実現が重要であり、筆者は伝送パラメータを含めた多重伝送方式の最適化およびそれを支える要素技術の開発に着目して研究を行ってきた。また、本研究成果の一部は既に LTE や WiMAX で採用されており、所要伝送帯域幅などの伝送パラメータについても IMT-Advanced などで定義されている値にほぼ一致している。

本論文でまとめられている研究項目は以下の通りである。

- 1) 高速移動時に 100Mbps 以上の伝送速度かつ面的サービスが可能な多重伝送方式に関する研究およびその伝送パラメータの決定
- 2) 高効率広帯域無線伝送の実現に必須となる低演算量かつ高精度多重波伝搬路推定手法の研究およびその効果の検証
- 3) OFDM 伝送で問題となるガードインターバルを超える長時間遅延波に起因するシンボル間干渉およびキャリア間干渉が受信性能に与える影響の検証およびその影響を低減できる手法の研究
- 4) 高速移動時におけるピーク伝送速度の向上を目的とした空間多重型 MIMO (Multi-input Multi-output) -OFDM システムの研究およびその効果の検証

上記に対する研究成果として、1) の研究では、200km/h 以上の高速移動時にも 100Mbps の伝送速度が確保できる OFDM ベースの多重伝送方式およびその伝送パラメータを明らかにしている。面的なサービスを前提とした周波数リユースファクタを考慮したシステムレベルシミュレーションによるシステム容量評価も行い、FFR (Fractional Frequency Reuse) 技術の有効性も確認している。

2) の研究では、OFDM 伝送特有の性質を利用した新たな伝搬路推定方式を導入することで、実運用環境において性能上界をほぼ達成する受信特性が得られることを計算機シミュレーションのみならず室内実験を通じて確認している。

3) の研究では、周期的に挿入されるパイロットシンボル (既知信号) を活用することで演算量を抑えた新たなシンボル等化方式を導入し、ガードインターバルの数倍に達する長時間遅延波発生時においても良好な受信特性が得られることを室内実験で確認している。特に、許容遅延時間内に効果的な繰り返し等化を行う手法については理想特性に近い性能が得られている。

4) の研究では、高速移動時の受信性能劣化に対処するため、低演算量でフルダイバーシチ効果が得られる MIMO-OFDM 受信方式を導入することで、性能上界に漸近する特性を従来手法の 1/7 で実現可能であることを計算機シミュレーションで確認している。

横 田 健 治 (高橋教授)

「通信品質向上のためのネットワークシステム制御技術」

平成 24 年 3 月 26 日授与

近年、インターネット利用者やインターネット上のサービスの種類の増加に伴い、ネットワークに対する通信品質の要求も高まっている。本論文は、通信品質向上の目的のために、ネットワークシステム制御技術に関して物理ネットワークとオーバレイネットワークの双方から検討したものである（図1参照）。

1. ヘビーユーザによる大量のトラフィックが他のユーザの通信品質低下を招く問題を解決するために、新たなパケットスケジューリング方式を提案した。従来手法では、ヘビーユーザを制限するためにフローサイズをカウントしていたが、ルータ負荷が大きいという問題があったため、ルータ負荷の増大を抑えるように改良した手法を提案した。また、フローの伝送レートを基にして優先制御を行う方式も提案した。

2. ルータにおいて電気・光変換を行う処理が通信速度向上の障害になっている問題に着目し、タイムスロット交換によりパケットを光のまま処理できる伝送システムの検討を行った。光タイムスロット交換の従来手法では、各中継器においてタイムスロット位相が同期している必要があったが、タイムスロット位相が非同期の場合の運用法と効率の良いタイムスロット割り当て手法を提案し、その有効性を示した。

3. Web サーバにアクセスが集中することでダウンロード時間が増加する、フラッシュクラウドと呼ばれる現象を解決するためのサーバ負荷分散手法を提案した。提案手法では、他のユーザにコンテンツのアップロードの一部を負担させることで、Web サーバへのアクセスの緩和を図る。提案手法のアプリケーションを実装し、実際の Web サーバを用いた実験によりダウンロード時間を削減できることを確認した。

4. クラウドサービスでは利用者とデータセンタが物理的に遠い位置に配置され、遅延時間が増加することで通信品質が低下するという問題を解決するために、位置情報を考慮したサーバ分散配置手法を提案した。提案手法では、クラウド事業者の他にサーバ保持者という概念を導入し、インセンティブを与えることでサーバを分散配置することができる。

5. P2P ファイル共有アプリケーションにおいて、人気順位の低いコンテンツがP2P ネットワーク上で見つけにくいという問題を解決するために、コンテンツとピアのクラスタリング手法を提案した。提案手法では、クラスタリングによりコンテンツ保持の分業を行うことで、人気順位の低いコンテンツが各ピアのキャッシュに残りやすくなる。シミュレーション評価を行い、コンテンツの検索成功率が向上することを示した。

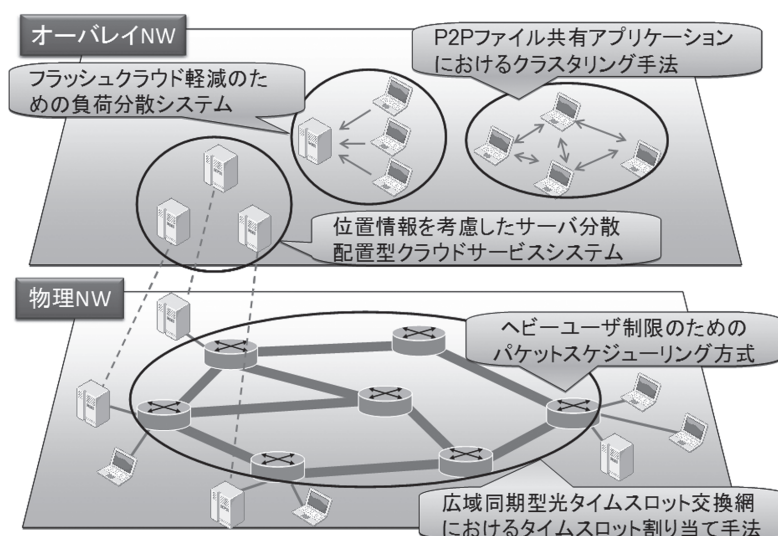


図1 博士論文の概要

田 村 昌 也 (佐藤 (亨) 教授)

「Research on a compact and high-performance filter for wireless LAN and suitable sensor structure for downsizing of measurement equipment based on control of electromagnetic waves」

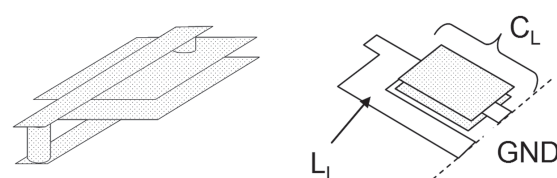
(電磁波制御技術を用いた小型で高性能な無線 LAN 用フィルタ、及び測定装置の小型化に適したセンサ構造に関する研究)

平成 24 年 9 月 24 日授与

本論文は、WLAN 用フィルタ及びバイオセンサに関する研究の成果を報告している。本研究の目的は 2 つある。1 つは、通信品質を劣化させることなく携帯端末の小型・薄型化を実現することで、もう 1 つは、自宅や病院にて容易に定量的な診断を実現することである。今回、前者を実現するために WLAN 用フィルタの小型・低背化について、後者を実現するために装置の小型化に適したバイオセンサへの適用可能性について研究を行った。

1. WLAN 用フィルタ

まず、従来の設計手法、いわゆる右手系の原理を使って検討を進めた。具体的には、セラミック内の導体パターンを用いてステップインピーダンス共振器と分割リング共振器の効果を持つ小型共振器 (図 1 (a)) を考案し、その動作原理および設計方法を明らかにした。この共振器を用いて設計した WLAN 用フィルタは、これまでに報告されたフィルタに比べ、その性能を劣化させることなく、約 14 % の小型化を実現できた。



(a) 従来技術がベース (b) CRLH-TL がベース
図 1：考案した共振器

続いて、メタマテリアルの表現方法の一つである右手左手系複合線路 (CRLH-TL) の概念を用いた共振器 (図 1 (b)) を考案した。この共振器は、その構成から分布定数型共振器としても集中定数型共振器としても扱うことが出来る。そこで、分布定数型と集中定数型の 2 通りの設計手法を確立し、WLAN 用フィルタを設計した。結果、さらに約 50 % の小型化を実現できた。

今後、半導体部分は 1 チップ化が進むと予想され、フィルタは半導体を実装する基板内に配置されることになるだろう。これは導体パターンによるフィルタ設計の重要性が増すことを意味しており、本研究の成果が貢献できるといえる。

2. バイオセンサ

プラズモン現象を利用した新しいバイオセンサの構造として金属-絶縁体-金属 (MIM) 構造がある。しかしながら、その動作原理はこれまで明らかにされていない。そこで、電磁界分布を元に MIM のこの動作原理を明らかにし、 0° 入射が可能であることを示した。そして、光フィルタ理論を使って MIM 構造を設計できることを明らかにした。最後に絶縁体層に試液を注入して濃度と共鳴波長の関係を比較し、センサとして動作することを示した。

今後、オーダーメイド医療が進み、地方診療所や個人でも扱える簡易診断装置が必要とされるだろう。その際は、小型な装置の重要性が増すことから、本研究の成果が貢献できるといえる。

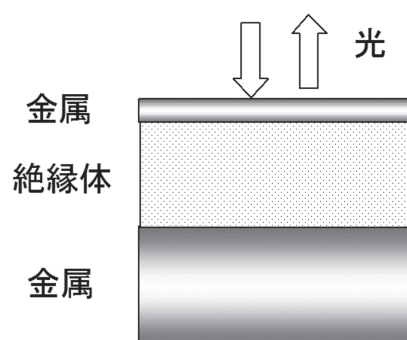


図 2：MIM 構造

青 柳 西 蔵（下田教授）

「行動変容のためのオンラインコミュニティに関する研究」

平成 24 年 9 月 24 日授与

オンラインコミュニティの利用は、様々な場面における人の行動を社会的に望ましい方向に変容させる手法として有望である。オンラインコミュニティに参加することで、人はその行動についての情報交換や、他者からの心理的な影響等によって行動の変容を促される。また、こうした活動をオンラインで行うことで、情報の処理や提示方法の工夫によって、参加者の負担の小さな非同期分散型通信など、対面では実現困難な様々なコミュニケーションが実現できるというメリットがある。しかし、現時点では行動変容のためのオンラインコミュニティの要件や、この行動変容の過程について明らかになっておらず、参加者や促進対象の行動、それらを取り巻く状況に合わせて適切なコミュニティを設計する方法論が確立されていない。そのため、しばしば既存のコミュニティはドロップアウトなどの問題を引き起こしてしまう。本研究の目的は、(1) コミュニケーション内容とつながりの強さという2つの軸に着目して行動変容のためのオンラインコミュニティを設計・実践し、(2) その結果について、特につながりやコミュニケーションの参加者の行動への影響について分析することである。こうした知見が行動変容のためのオンラインコミュニティ設計の方法論の確立に寄与し、家庭における省エネルギー行動の促進等にも応用が期待される。

本研究ではまず、行動変容の段階と社会的要請レベルという2つの軸に注目し、参加者・行動・状況のタイプを判別する。この2つは行動変容に必要な介入の種類を規定する支配的な要因であり、これらを考慮することで、様々な参加者・行動・状況の組み合わせにおいて、オンラインコミュニティが実現すべき介入の種類を導出できると考えた。次に、それぞれの参加者・行動・状況のタイプに応じて、コミュニティ参加者間のつながりの強さ、及びコミュニティの活動におけるコミュニケーションの内容を適切に選ぶ。この2つは、参加者がコミュニティから受ける影響を規定する主要な要素であり、これらの要素によって、様々な参加者・行動・状況の組み合わせにおいて効果的にコミュニティの活動への参加を促し行動変容に必要な介入を実現することができると考えた。最後に、適切な行動指針に従ってコミュニティ活動を活性化する特別な参加者である誘発者の導入や、情報システムの機能等の具体化要素によってコミュニケーション内容やつながりの強さを具体化する。

この方針に従って、原子力発電所におけるヒヤリハット活動促進のための「ヒヤリハット共有コミュニティ」、家庭内環境配慮行動促進のための「エコ部」および「あしあとコミュニケーション場」という3つの行動変容のためのオンラインコミュニティを設計した。そして、これらのコミュニティを実際の現場で実践し、その結果について、特につながりやコミュニケーションの参加者の行動への影響について分析した。その結果、それぞれ多くの参加者の行動変容を促すことができ、また各コミュニティでの行動変容に影響する特徴的な事例や要因の具体例を示すことができた。例えば、誘発者が率先して行動した場合は多くの場合参加者間のつながり形成が促され、参加者に活動参加を促す制度を設定することが参加を促進させた。また、密なつながりのコミュニティでは「ご安全に」等の参加を活発にするコミュニケーションパターンが見出された。これらの実践の結果を基に、より確実に行動変容を引き起こすコミュニティを設計できるように、オンラインコミュニティの要素のそれぞれの概念や具体化方法に修正を加えた。

福 原 始 (山川教授)

「Miniaturization and Integration of Measurement Systems for Space Electromagnetic Environments」

(宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)

平成 24 年 9 月 24 日授与

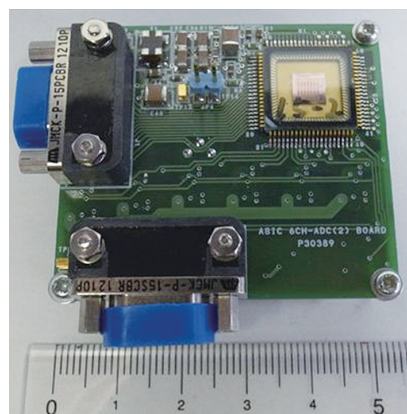


図 1：マッチ箱サイズになった波形捕捉型プラズマ波動受信器。

宇宙プラズマは無衝突であり、その運動エネルギーはプラズマ波動を介して授受される（波動-粒子相互作用）。このため、宇宙電磁環境を探索する衛星では、必ずプラズマ波動受信器が搭載される。本論文では、プラズマ波動受信器の小型・集積化と波動-粒子相互作用を捉える初めての計測手法の小型ハードウェア化を ASIC を用いて実現させた研究をまとめたものである。

プラズマ波動観測器の小型化集積化：プラズマ波動観測器は、低ノイズアンプ、各種フィルタなど、アナログ回路が装置全体で大きな部分を占める。一方、宇宙ミッションにおける重量などのリソースに対する要求は、ミッションの高度化に伴い益々厳しくなり、観測装置の小型化は必須である。本論文では、プラズマ波動受信器をアナログ ASIC 内に設計・開発することによって、非常に小型化する

ことに成功した。特に、波形捕捉型受信器で必要となる高次アンチエイリアシングフィルタ等を組み込んだ電磁界 6 成分を同時に計測できる 5mm 角のチップを実現した。そして、そのチップと電源回路などを含めた波形捕捉受信器基板を 45mm x 50mm というサイズにまで小型化した。これは従来の受信器のサイズに比して一桁以上小型化されておりディスクリート部品では到底達成できないサイズの受信器を完成させた。更に、本論文では小型プラズマ波動観測器の科学観測へのアプリケーションとして、ナノサットコンステレーション観測によるプラズマ圏の微細構造解析に対するミッション設計も行った。これは直線偏波の電波を放射する親衛星に対し、小型プラズマ波動観測器を搭載したナノサット衛星を複数機編隊させ、放射された電波のファラデー回転を観測することで伝搬途中のプラズマ微細構造を捉えようとするものである。この観測原理をレイトレーシングにより検証した上で、ミッションの詳細設計を行いそのフィージビリティを示した。

波動-粒子相互作用計測新手法とハードウェア化：本論文では、波動と粒子のエネルギー授受量を定量的に取り扱うことのできる世界初の観測手法を提案し、そのアルゴリズムを FPGA としてハードウェア化することに成功した。従来までは独立に計測していたプラズマ粒子とプラズマ波動を、本論文では、衛星機上で連携観測しそのエネルギー交換量を決める波動ベクトルと粒子速度ベクトルの角度差をオンボードで求めていくこの手法を確立した。そして、本手法を「Wave-Particle Interaction Analyzer」と名付け、FPGA によってそのアルゴリズムをハードウェア化し、機上リアルタイム処理を実現するに至った。このアルゴリズムは我が国の次期衛星ミッション ERG において採用され、地球放射線帯における波動-粒子相互作用の解明に大きな役割を果たしてくれるものと期待されている。

以上の研究成果は、今後の科学衛星ミッションに対して非常に大きなインパクトを与えるものであり、高度化するミッションを、限られたリソースでどのように実現していくか、について一つの重要な方向性を示したものである。